扩行距、缩株距对春玉米冠层结构及产量的影响

何冬冬[1];杨恒山[1,2];张玉芹[1,2]

（1）. 内蒙古民族大学农学院 通辽 028000; (2). 内蒙古自治区饲用作物工程技术研究中心 通辽 028000

摘 要: 为探究西辽河平原地区玉米扩行距、缩株距密植增产的生理生态机制，本研究以紧凑耐密玉米品种'农华 101'和半紧凑耐密玉米品种'伟科 702'为试验材料，在 6×10^4 株 hm^{-2}(D1)、7.5×10^4 株 hm^{-2}(D2)、9×10^4 株 hm^{-2}(D3)密度下，设置扩行距、缩株距(KH，种植行距为 100 cm, D1、D2 和 D3 株距分别为 16.67 cm、13.33 cm 和 11.11 cm)和当地农民常规种植（CK，种植行距为 60cm, D1、D2 和 D3 株距分别为 27.78 cm、22.22 cm 和 18.52 cm）2 种种植模式，测定玉米吐丝期、乳熟期及完熟期玉米冠层叶面积指数、茎叶夹角、叶向值、透光率和产量及其构成因素，计算叶面积衰减率，研究扩行距、缩株距种植对春玉米产量及冠层结构特性的影响。结果表明，2 品种 KH 种植下产量均显著＞CK，以 D2 密度下增产最明显，'农华 101'较 CK 高 7.8%(2015 年)和 7.0%(2016 年)，'伟科 702'较 CK 高 5.6%(2015 年)和 5.9%(2016 年)；生育后期 2 品种 KH 种植下叶面积指数均＞CK，且乳熟期均达显著水平，D2 密度下差异最大，'农华 101'较 CK 高 13.7%(2015 年)和 11.1%(2016 年)，'伟科 702'较 CK 高 11.4%(2015 年)和 15.8%(2016 年)；2 品种 KH 种植下均表现为上部叶片茎叶夹角较小，叶向值较大，而中部叶片和下部叶片茎叶夹角较大，叶向值较小；2 品种 KH 种植下冠层透光率各层位均＞CK，其中顶层和穗位层均达显著水平。D1 密度下，除 2015 年吐丝期'伟科 702'外均表现为顶层差异＞穗位层＞底层，D2、D3 密度下，除 2015 年乳熟期 D3 密度下'伟科 702' 外均表现为穗位层差异＞顶层＞底层，且以吐丝期 D2 密度下差异最为明显，'农华 101'较 CK 高 5.1%(2015 年)和 5.0%(2016 年)，'伟科 702'较 CK 高 5.0%(2015 年)和 4.9%(2016 年)。综上所述，在较高密度种植下 KH 种植模式冠层结构更为合理，产量更高，且不同品种对 KH 种植模式的响应存在差异，其中'农华 101'各层位叶面积指数、茎叶夹角均<'伟科 702'；各层位叶向值、冠层透光率均>'伟科 702'；实测产量不同密度下均>'伟科 702'，在 7.5×10^4 株 hm^{-2} 密度下产量最大，且'农华 101'较'伟科 702'增产更为明显。

关键词: 春玉米; 扩行缩株; 冠层结构; 种植密度; 产量

中图分类号: S513 **文献标识码:** A

Effects of expanding line spacing and shrinking row spacing on the canopy structures and yields of spring corn*

HE Dongdong[1], YANG Hengshan[1,2**], ZHANG Yuqin[1,2]

(1. Agriculture College of Inner Mongolia University for the Nationalities Tongliao 028400 China; 2. Engineering Research Center of Forage Crops in Inner Mongolia Autonomous Region, Tongliao 028400, China)

Abstract: In order to explore the physiological and ecological mechanisms of expanding line spacing and shrinking row spacing for close planting and yield increasing of corn in Xiliaohe Plain, the study was conducted with two corn varieties compact density-enduring 'Nonghua 101' and semi-compact maize variety 'Weike 702' as materials in densities of 6×10^4 plants hm^{-2} (D1)、7.5×10^4 plants hm^{-2} (D2) and 9×10^4 plants hm^{-2} (D3). With the contrast of conventional cultivation (CK, the row distance was 60cm, D1、D2 and D3 of plant distance were 27.78 cm、22.22 cm and 18.52 cm) and plantation of expanding line spacing and shrinking row spacing (KH, the row distance was 100cm, D1、D2 and D3 of plant distance were 16.67 cm、13.33 cm and11.11 cm), the leaf area index, angle of stem to leaf, leaf orientation value, light transmittance, yield and component factors of maize canopy in spinning stage, milk-ripe stage and full ripe stage were determined; leaf area attenuation rate was calculated. Then the effects of plantation of expanding line spacing and shrinking row spacing on spring corn yields and canopy structures were studied. The results showed that the yield of KH was significantly higher than that of CK, in which yield increase was the most obvious in D2 density; and the yield of 'Nonghua 101' was 7.8% (2015) and 7.0% (2016) higher than CK; the yield of 'Weike 702' was 5.6% (2015) and 5.9% (2016) higher than CK. The leaf area index of KH was higher than that of CK in late growth stage, and reached the highest level at milk-ripe stage, in which the variance was the most obvious in D2 density. The yield of 'Nonghua 101' was 13.7% (2015) and 11.1% (2016) higher than CK; the yield of 'Weike 702' was 11.4% (2015) and 15.8% (2016) higher than CK. The angle of stem to leaf of the upper leaves was smaller and the leaf orientation value was larger, while the angle of stem to leaf of the middle leaves and the lower leaves were larger and the leaf orientation value was smaller in KH plantation of 2 varieties.The translocation rates of canopies were higher than that of CK in KH plantation of 2 varieties; under the D1 density, 'Weike 702' all showed as the difference of the top layer> spike layer> bottom layer except 2015; under the D2 and D3 densities, 'Weike 702' all showed as the difference of spike layer> the top layer> bottom layer under the D3 density, and the differences were the most obvious under the D2 density except 2016. 'Nonghua 101' was 5.1% (2015) and 5.0% (2016) higher than CK; 'Weike 702' was 5.0% (2015) and 4.9% (2016) higher than CK. In conclusion, the canopy structure of KH planting pattern is more reasonable under a higher density, and the yield was higher, and

the response of different varieties to KH planting pattern was different. The leaf area index and the angle of stem of ‘Nonghua 101’ are less than ‘Weike 702’. The leaf aspect value and canopy transmittance of all horizons were greater than those of ‘Weike 702’; the measured yield under different densities were greater than ‘Weike 702’, the yield was the highest under the 7.5×10^4 plant hm^{-2} .Moreover, the yield of ‘Nonghua 101’ was more obvious than that of ‘Weike 702’.

Keywords: Spring corn; Line spacing expansion and row spacing shrinkage; Canopy structure; Planting density; Yields

进入 21 世纪，随着社会经济的快速发展，劳动力稀缺程度开始上升，机会成本不断提高。同时，畜牧业、加工业的快速发展对玉米需求的拉动，使玉米种植面积迅速扩大，在保证单产不降低的前提下，高产、高效的协同及技术简化成为这一时期玉米栽培研究的主要目标[1]。相关研究表明，玉米产量的高低与种植密度[2-3]和群体冠层结构[4-5]密切相关。增加种植密度是实现增产的有效途径之一，但随种植密度的进一步增加，群体内光截获率加大造成田间郁蔽、通风透光条件变差[6-8]，直接影响群体光合生产进一步导致植株倒伏早衰[9]。目前西辽河平原地区玉米种植密度在 $6.0\sim6.5\times10^4$ 株 hm^{-2}，在耐密高产品种的选育和推广没有突破性进展的背景下，西辽河平原要想实现增密增产，必须进一步优化株行距配置[10]，株行距配置对于建造良好的群体冠层结构具有重要意义[11-13]。合理的冠层结构可减缓玉米后期叶片衰老，维持较高的光合能力，进而提高产量[14-15]。前人关于株行距配置对群体冠层结构影响的研究较多，但受地域和环境等因素的影响，结果并不一致[16-18]。目前西辽河平原地区株行距配置方式尚少见报道。2014 年课题组提出了以扩行距、缩株距为核心内容的宽行轻简种植模式，前期研究发现该模式能显著改善增密后群体的通风透光性能，减少花粉散落至叶片对光合作用的负面影响，增强群体后期光合能力；也有利于追肥、喷药、收获等田间管理，降低人为和机械操作难度，减少作业次数，较好地实现了高产、高效及技术简化的协同[10,19]。探讨该模式冠层结构配置，可为该地区构建合理冠层提供理论参考和技术支撑。因此本文以当地农民常规种植为对照，系统地研究扩行距、缩株距种植下春玉米冠层结构及产量的变化，以期探明西辽河平原春玉米密植高产的生理生态机制。

1 材料与方法

1.1 试验区自然概况

试验分别于 2015 年和 2016 年在地处西辽河平原中部的内蒙古民族大学试验农场(43°36'N，122°22'E)进行，试验区海拔 178 m，年平均气温 6.8 ℃，≥10℃的活动积温平均 3 200℃ d，平均无霜冻期 150 d 左右，平均降水量 384.6 mm。试验地土壤为灰色草甸土，是当地主要土壤类型。播前试验地耕层(0~20 cm)土壤有机质为 16.09 g kg^{-1}，全氮为 1.06g kg^{-1}，碱解氮为 40.43 mg kg^{-1}，速效磷为 11.43 mg kg^{-1}，速效钾为 121.22 mg kg^{-1}。

1.2 试验设计

供试品种为‘农华 101’和‘伟科 702’，为当地主推高产品种，2 品种间形态特征差异较大，‘农华 101’为紧凑耐密型品种，‘伟科 702’为半紧凑耐密型品种。试验设置扩行距、缩株距种植模式(以下均称扩行缩株、KH)和当地农民常规种植模式(以下均称常规种植、CK)。种植密度均设为 6×10^4 株 hm^{-2} (D1)、7.5×10^4 株 hm^{-2}(D2)和 9×10^4 株 hm^{-2}(D3)。KH 种植行距为 100 cm, D1、D2 和 D3 株距分别为 16.67 cm、13.33 cm 和 11.11 cm; CK 种植行距为 60cm, D1、D2 和 D3 株距分别为 27.78 cm、22.22 cm 和 18.52 cm。试验为定位试验，小区面积为 40 m^2，随机排列，重复 3 次。各处理栽培管理措施一致，其中基肥为磷酸二铵 150 kg hm^{-2}，硫酸钾 90 kg hm^{-2}，小喇叭口期一次追施尿素 320 kg hm^{-2}。生育期内共浇水 4 次，铲、耥各 3 次。4 月 30 日(2015 年)和 5 月 1 日(2016 年)播种, 9 月 26 日(2015 年)和 9 月 27 日(2016 年)收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶面积指数

分别于吐丝期、乳熟期和成熟期各小区取代表性植株 3 株，测定样株所有绿叶叶片的长和宽。

单叶叶面积=长 × 宽 × 系数(未展开叶片系数为 0.5，展开叶片系数为 0.75) (1)

$$\text{叶面积指数(LAI)}=\frac{\text{单位土地面积内叶片总面积}}{\text{单位土地面积}} \quad (2)$$

1.3.2 叶面积衰减率

$$吐丝–乳熟叶面积衰减率(\%)=\frac{吐丝期叶面积-乳熟期叶面积}{吐丝期叶面积}\times 100\% \quad (3)$$

$$乳熟–完熟叶面积衰减率(\%)=\frac{乳熟期叶面积-完熟期叶面积}{乳熟期叶面积}\times 100\% \quad (4)$$

1.3.3 茎叶夹角和叶向值

在吐丝期分别于各小区选取代表性植株3株，将叶片分为3层，以棒三叶为中部叶片，其上为上部叶片，其下4片叶为下部叶片，测定叶片叶长和叶高，使用量角器测量茎叶夹角，求得叶向值。

叶向值[4]$(LOV)=\sum_{i=1}^{n}\theta_i\left(L_f/L_i\right)/n$(式中 θ_i 为叶片与水平面夹角，L_f 为沿叶片方向叶基至叶片最高点的距离，L_i 为叶片伸直长度，n 为叶片数） (5)

1.3.4 冠层透光率

在吐丝期、乳熟期分别于各小区选取代表性样方 5 m^2，使用 SunScan(SS1)植物冠层分析仪测定冠层上部(雄穗上方)的 PAR、顶层(穗上第四叶)的 PAR、穗位层(穗位叶)的 PAR、冠层底部(距地面 20 cm)的 PAR，求得各层透光率。

$$冠层透光率^{[15]}(\%)=\frac{测定层\ PAR}{冠层上部\ PAR}\times 100\% \quad (6)$$

1.3.5 产量及其构成因素

各小区测产面积为30 m^2，查各测产区有效穗数，人工脱粒后测鲜粒重和含水率，并折算成含水量为14%的产量。分别取 10 穗风干后考种，查穗行数、行粒数，计算穗粒数，测定千粒重。

1.4 数据处理与统计分析

使用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理并作图表，SPSS 19.0 进行数据统计分析，LSD 法检验处理间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 扩行缩株种植模式下春玉米产量及其构成因素

由表 1 可知，有效穗数各处理间差异不显著；穗粒数各处理均随密度增加而降低，且均表现为 KH＞CK，除 2015 年‘伟科 702’D3(9×10^4 株 hm^{-2})和 2016 年‘伟科 702’D2(7.5×10^4 株 hm^{-2})密度外，均达到显著水平；千粒重规律与穗粒数相同，除 2015 年‘农华 101’D2 密度外，其他均没有达到显著水平。各处理不同种植密度下实测产量均表现为 D2＞D3＞D1(6×10^4 株 hm^{-2})；不同处理间均表现为 KH＞CK，且均达显著水平。其中 KH‘农华 101’实测产量均大于 KH‘伟科 702’，且与 CK 相比，‘农华 101’增产幅度均大于‘伟科 702’，尤以 D2 密度下为甚，达 7.8%(2015 年)和 7.0%(2016 年)。

表 1 扩行缩株(KH)常规(CK)种植模式下春玉米产量及其构成因素

Table 1 Yield and its constituent factors of spring corn under the pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage (KH) and conventional pattern (CK)

年份 Year	种植密度 Plant density (×10^4 plants hm^{-2})	品种 Variety	种植模式 Planting pattern	有效穗数 Effective spike (×10^{4}ear hm^{-2})	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-kernel weight（g）	实测产量 Actual yield (t hm^{-2})
2015	6	农华 101 HN101	KH	5.57±0.11a	612.55±11.14a	414.94±9.74a	13.99±0.18a
			CK	5.37±0.14a	570.31±10.87b	410.77±8.32a	13.08±0.14b
		伟科 702 KW702	KH	5.84±0.18a	608.14±10.01a	412.65±10.12a	13.80±0.20a
			CK	5.67±0.21a	564.08±12.46b	411.61±8.73a	13.09±0.13b
	7.5	农华 101 HN101	KH	6.90±0.11a	566.06±8.76 a	408.22±9.96a	15.18±0.04a
			CK	6.97±0.16a	504.52±9.30b	394.80±5.18b	14.08±0.07b
		伟科 702 KW702	KH	6.77±0.12a	556.83±9.09a	401.71±8.60a	14.80±0.18a
			CK	6.90±0.17a	535.91±10.90b	396.87±9.12a	14.02±0.17b
	9	农华 101 HN101	KH	8.37±0.16a	519.80±13.48a	390.87±9.81a	14.90±0.08a
			CK	8.38±0.15a	470.14±10.57b	380.52±9.42a	14.34±0.16b
		伟科 702 KW702	KH	8.37±0.21a	494.51±10.16a	387.93±10.64a	14.76±0.17a
			CK	8.24±0.13a	483.81±9.31a	381.56±11.41a	14.21±0.20b

2016	6	农华 101 HN101	KH	5.53±0.18a	607.71±9.62a	409.13±16.65a	12.93±0.15a
			CK	5.46±0.14a	561.41±12.34b	381.91±15.34a	12.18±0.10b
		伟科 702 KW702	KH	5.42±0.17a	603.17±13.67a	392.20±10.53a	12.85±0.09a
			CK	5.52±0.15a	550.89±12.51b	389.99±10.14a	12.14±0.17b
	7.5	农华 101 HN101	KH	7.11±0.19a	558.52±13.60a	367.22±11.94a	13.98±0.12a
			CK	6.94±0.17a	514.99±10.94b	357.81±6.79a	13.07±0.14b
		伟科 702 KW702	KH	6.82±0.16a	539.74±15.67a	374.08±9.72a	13.84±0.11a
			CK	6.96±0.10a	507.53±13.85a	368.40±8.14a	13.07±0.19b
	9	农华 101 HN101	KH	8.44±0.11a	508.79±10.61a	335.23±11.01a	13.80±0.14a
			CK	8.47±0.13a	454.48±12.93b	322.95±10.64a	13.05±0.16b
		伟科 702 KW702	KH	8.37±0.18a	486.51±11.14a	340.45±9.54a	13.70±0.08a
			CK	8.49±0.17a	431.99±10.68b	330.89±9.83a	13.02±0.17b

KH: 扩行缩株种植模式; CK: 当地农民常规种植模式。数据后不同小写字母表示同年、同密度、相同品种、不同处理间差异达 0.05 显著水平, ±后数字表示标准差。KH: Planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage; CK: Planting pattern of convention in local farmers. Different letters in the same varieties compare between of different treatment at same year and density show significantly different at the 0.05 probability levels, the number after plus or minus means the standard deviation.

春玉米产量的方差分析结果见表 2。由表 2 可知, KH 种植模式下品种间实测产量差异显著(P<0.05), CK 种植模式下差异不显著。这可能是在 KH 种植下, ‘农华 101’增产幅度较‘伟科 702’高所致。种植密度和年限对 KH 种植模式和 CK 种植模式下实测产量均有极显著影响(P<0.01), 说明增加密度后产量变化较明显, 年限间差异是由于 2 年试验区气象条件差异较大。从各因素交互作用的方差结果来看, 品种、种植密度和年份间任意两个因素及 3 个因素之间 KH 和 CK 交互作用均不显著。

表 2　扩行缩株(KH)常规(CK)种植模式下春玉米产量方差分析

Table 2　Variance analysis results of spring corn yield under planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage (KH) and conventional pattenr (CK)

源 Source	KH		CK	
	F	P	F	P
品种 Variety (A)	7.171	0.013	0.312	0.582
种植密度 Plant density (B)	105.421	0.008	103.051	0.009
年份 Year (C)	270.858	0.003	259.914	0.005
A×B	0.479	0.625	0.115	0.892
A×C	1.028	0.321	0.039	0.845
B×C	0.152	0.860	2.354	0.117
A×B×C	0.209	0.813	0.112	0.894

KH: 扩行缩株种植模式; CK: 当地农民常规种植模式; A: 品种; B: 种植密度; C: 年份。KH: Planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage; CK: Planting pattern of convention in local farmers; A: Variety; B:Plant density; C: Year.

2.2　扩行缩株种植模式下春玉米叶面积指数

2.2.1　不同生育时期叶面积指数的变化

由表 3 可知, 各处理不同生育时期叶面积指数均表现为吐丝期>乳熟期>完熟期, 且均随种植密度增加而增加。不同种植密度下吐丝期除 2015 年‘伟科 702’D2 外均表现为 KH<CK; 乳熟期和完熟期均表现为 KH 大于 CK, 其中乳熟期均达到显著水平, 以 D2 密度下差异最大, ‘农华 101’较 CK 高 13.7%(2015 年)和 11.1%(2016 年), ‘伟科 702’较 CK 高 11.4%(2015)和 15.8%(2016 年); 完熟期 2015 年均达到显著水平, 2016 年无显著差异。2 品种间不同种植密度下各生育时期均表现为 KH ‘伟科 702’>KH‘农华 101’。

表 3　扩行缩株(KH)常规(CK)种植模式下春玉米叶面积指数的变化

Table3　Changes of leaf area index of spring corn under the pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage(KH) and conventional pattenr (CK)

年份 Year	种植密度 Plant density (×10^4 plants hm^{-2})	品种 Variety	种植模式 Planting pattern	叶面积指数 Leaf area index		
				吐丝期 Silking	乳熟期 Milking	完熟期 Maturity
2015	6	农华 101 HN101	KH	4.56±0.16a	4.55±0.14a	2.71±0.08a
			CK	4.66±0.11a	4.21±0.19b	2.37±0.10b
		伟科 702 KW702	KH	5.09±0.10a	5.08±0.10a	2.95±0.13a
			CK	5.14±0.08a	4.46±0.16b	2.55±0.14b

	7.5	农华 101 HN101	KH	5.36±0.12a	5.15±0.14a	3.04±0.12a
			CK	5.39±0.14a	4.53±0.11b	2.36±0.14b
		伟科 702 KW702	KH	6.19±0.12a	5.94±0.20a	3.44±0.10a
			CK	6.05±0.12a	5.33±0.12b	2.65±0.16b
	9	农华 101 HN101	KH	6.43±0.16a	6.06±0.21a	3.38±0.10a
			CK	6.58±0.10a	5.46±0.13b	2.77±0.14b
		伟科 702 KW702	KH	7.29±0.11a	6.86±0.21a	3.65±0.10a
			CK	7.35±0.09a	6.26±0.20b	3.11±0.12b
2016	6	农华 101 HN101	KH	4.34±0.07a	4.26±0.10a	1.25±0.15a
			CK	4.38±0.13a	3.83±0.09b	1.04±0.13a
		伟科 702 KW702	KH	4.77±0.15a	4.64±0.11a	1.28±0.08a
			CK	4.96±0.17a	4.28±0.17b	1.12±0.06a
	7.5	农华 101 HN101	KH	5.20±0.19a	4.90±0.18a	1.33±0.09a
			CK	5.24±0.17a	4.41±0.12b	1.17±0.04a
		伟科 702 KW702	KH	5.70±0.07a	5.51±0.21a	1.49±0.15a
			CK	5.56±0.11a	4.76±0.14b	1.25±0.09a
	9	农华 101 HN101	KH	5.63±0.14a	5.24±0.11a	1.41±0.10a
			CK	5.76±0.11a	4.77±0.12b	1.26±0.08a
		伟科 702 KW702	KH	6.32±0.18b	5.81±0.21a	1.56±0.12a
			CK	6.65±0.10a	5.38±0.15b	1.39±0.14a

KH: 扩行缩株种植模式; CK: 当地农民常规种植模式。KH: Planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage; CK: Planting pattern of convention in local farmers.

春玉米叶面积指数的方差分析结果见表 4。由表 4 可知, KH 和 CK 种植模式下品种间、种植密度间及年份间各生育时期叶面积指数差异均达极显著(P<0.01)水平，说明不同种植模式下随密度增加叶面积指数均增加显著，且‘伟科 702’叶面积指数>‘农华 101’，均达显著水平。从各因素交互作用的方差结果来看，品种和种植密度间交互作用 KH 和 CK 各生育时期均不显著；品种和年份间交互作用 KH 吐丝期有显著差异(P<0.05)，说明吐丝期 KH 种植模式对不同品种的叶面积指数影响较大；种植密度和年份间交互作用 KH 和 CK 各生育时期差异达极显著(P<0.01)水平，说明种植密度和年份对叶面积指数影响要大于品种。品种、种植密度和年份 3 因素间交互作用 KH 和 CK 各生育时期均不显著。

表 4　扩行缩株(KH)常规(CK)种植模式下春玉米叶面积指数方差分析

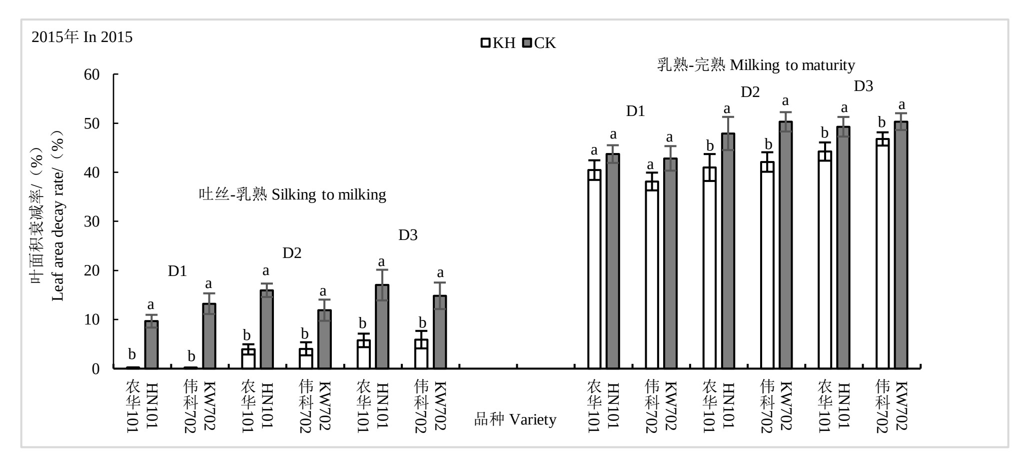
Table4　Variance analysis results of leaf area index of spring corn under planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage (KH) and conventional pattenr (CK)

源 source	KH						CK					
	吐丝期 Silking		乳熟期 Milking		完熟期 Maturing		吐丝期 Silking		乳熟期 Milking		完熟期 Maturity	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
品种 Variety (A)	753.608	0.004	182.430	0.012	5.003	0.089	49.704	0.002	120.180	0.025	8.566	0.043
种植密度 Plant density (B)	231.147	0.002	148.187	0.005	40.284	0.004	377.703	0.009	106.718	0.000	30.622	0.013
年份 Year (C)	331.460	0.003	55.087	0.018	371.247	0.003	23.915	0.039	68.251	0.014	445.530	0.002
A×B	1.719	0.211	1.507	0.252	0.044	0.957	3.841	0.079	1.918	0.179	0.548	0.589
A×C	18.399	0.013	4.225	0.109	0.211	0.670	0.052	0.830	2.696	0.176	0.259	0.638
B×C	8.956	0.003	9.049	0.002	27.522	0.003	9.317	0.002	4.975	0.021	11.012	0.002
A×B×C	0.269	0.768	0.033	0.968	1.481	0.257	1.958	0.174	2.139	0.150	0.645	0.538

KH: 扩行缩株种植模式; CK: 当地农民常规种植模式; A: 品种; B: 种植密度; C: 年份。KH: Planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage; CK: Planting pattern of convention in local farmers; A: Variety; B: Plant density; C: Year.

2.2.2 不同生育阶段叶面积衰减率

由图 1 可知，叶面积衰减率不同生育阶段随种植密度增加而增加，且各处理均表现为 KH<CK，其中吐丝-乳熟阶段均差异较大均达显著水平, 2015 年以 D1 密度下‘伟科 702’差异最大，达 13.0%, 2016 年以 D2 密度下‘伟科 702’差异最大，达 11.1%；乳熟-完熟阶段差异减小, 2015 年达到显著水平, 2016 年无显著差异。KH 处理下，春玉米吐丝后叶面积下降较 CK 缓慢，有利于叶片进行较好的光合作用，利于籽粒灌浆。



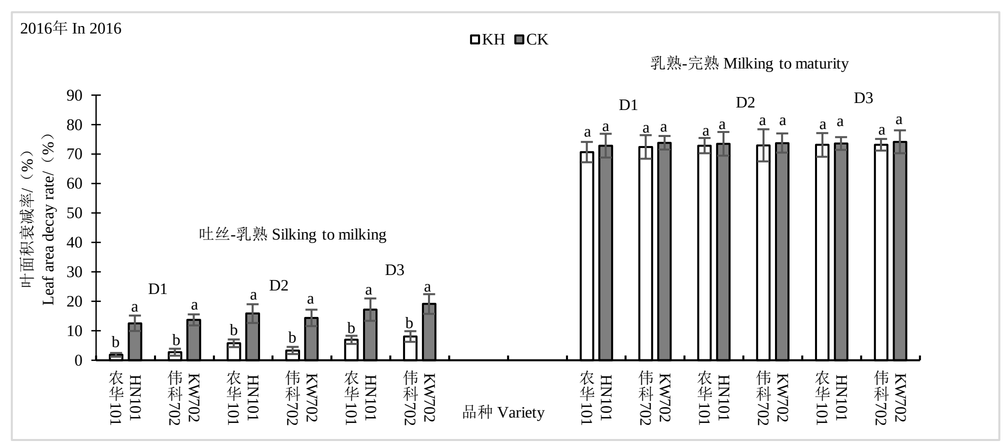


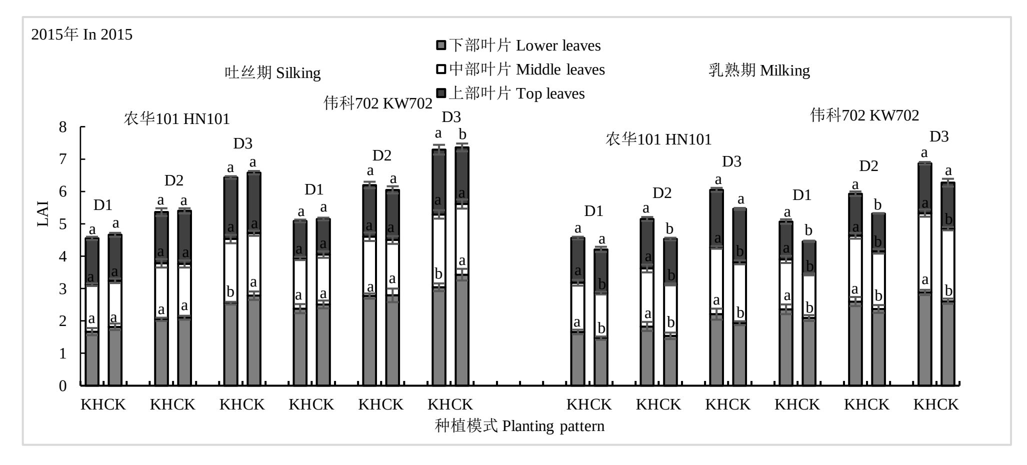
图 1　扩行缩株(KH)常规(CK)种植模式下春玉米叶面积衰减率的变化

Fig. 1　Changes of leaf area attenuation rate of spring corn under the pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage (KH) and conventional pattenr (CK)

KH: 扩行缩株种植模式; CK: 当地农民常规种植模式; D1: 6×10^4 株 hm^{-2}; D2: 7.5×10^4 株 hm^{-2}; D3: 9×10^4 株 hm^{-2}。不同小写字母表示同年、同时期、同密度、同品种、不同处理间差异达 0.05 显著水平。KH: Planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage; CK: Planting pattern of convention in local farmers; D1: 6×10^4 plants hm^{-2}; D2: 7.5×10^4 plants hm^{-2}; D3: 9×10^4 plants hm^{-2}. Different letters in the same varieties compare between of different treatment at same year and stage and density show significantly different at the 0.05 probability levels.

2.2.3　不同层位叶面积指数

由图 2 可知，各处理两时期不同层位叶面积指数均表现为下部叶片＞中部叶片＞上部叶片。叶面积指数各处理吐丝期上部叶片和中部叶片总体表现为 KH＞CK，下部叶片均表现为 KH＜CK，且大多数没有达到显著水平。叶面积指数乳熟期不同层位各处理均表现为 KH＞CK，且多数达显著水平，其中尤以 D2 密度下中部叶片为甚，KH‘农华 101’较 CK 高 12.6%(2015)和 7.1%(2016)，KH‘伟科 702’较 CK 高 14.0%(2015)和 14.1%(2016)。两时期各处理上部叶片总体表现为‘农华 101’＞‘伟科 702’；中部叶片和下部叶片总体表现为‘农华 101’＜‘伟科 702’。‘农华 101’ 各层位叶面积指数分布较均匀，而‘伟科 702’下部叶片分布较多，上部叶片分布较少，影响上部叶片的光合作用。



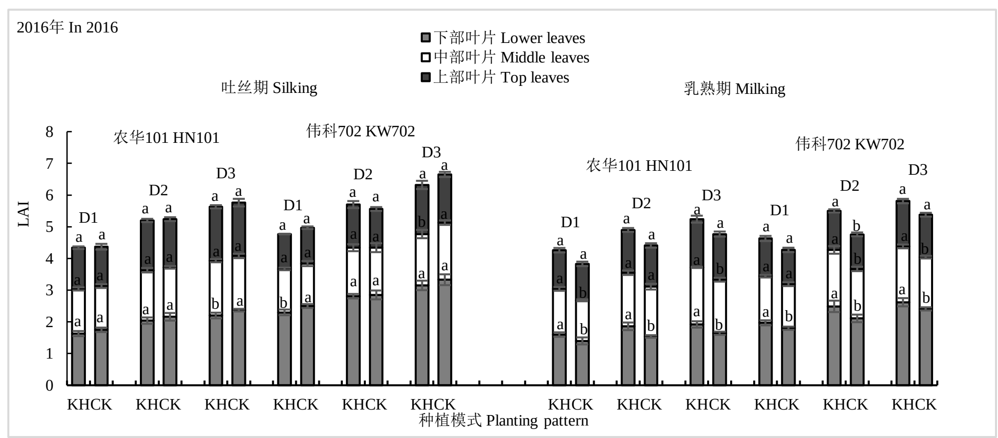


图 2 扩行缩株(KH)常规(CK)种植模式下春玉米不同层位叶面积指数的变化

Fig. 2 Changes of leaf area index in different layers of spring corn under the pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage(KH) and conventional pattenr (CK)

KH: 扩行缩株种植模式; CK: 当地农民常规种植模式; D1: 6×10^4 株 hm^{-2}; D2: 7.5×10^4 株 hm^{-2}; D3: 9×10^4 株 hm^{-2}。不同小写字母表示同年、同时期、同品种、同密度、同层位、不同处理间差异达 0.05 显著水平。KH: Planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage; CK: Planting pattern of convention in local farmers; D1: 6×10^4 plants hm^{-2}; D2: 7.5×10^4 plants hm^{-2}; D3: 9×10^4 plants hm^{-2}. Different letters in the same varieties compare between of different treatment at same year and stage and layers density show significantly different at the 0.05 probability levels.

2.3 扩行缩株种植模式下春玉米茎叶夹角

由表 5 可知，各处理不同层位茎叶夹角均表现为下部叶片＞中部叶片＞上部叶片，且均随种植密度增大而减小。茎叶夹角各处理间上部叶片均表现为 KH＜CK，除 D1 密度外均达显著水平，其中各处理 KH 较 CK 小 1.35~3.53 °(2015 年)和 2.03~3.96 °(2016 年)；中部叶片和下部叶片则均表现为 KH＞CK，但均没有显著差异。‘农华 101’各层位茎叶夹角均小于‘伟科 702’，群体冠层光能利用条件更为合理。

表 5 扩行缩株(KH)常规(CK)种植模式下春玉米茎叶夹角

Table5 Stem-leaf angle of spring corn under the pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage(KH) and conventional pattenr (CK)

年份 Year	种植密度 Plant density (×10^4 plants hm^{-2})	品种 Variety	种植模式 Planting pattern	茎叶夹角 Stem-leaf angle（°）		
				上部叶片 Top leaves	中部叶片 Middle leaves	下部叶片 Lower leaves
2015	6	农华 101 HN101	KH	12.96±1.02a	21.73±1.54a	22.40±2.14a
			CK	14.55±1.34a	19.40±1.74a	21.10±1.05a
		伟科 702 KW702	KH	13.25±1.05a	25.47±2.06a	31.80±2.81a
			CK	14.60±1.12a	24.33±2.14a	30.00±1.76a
	7.5	农华 101 HN101	KH	10.92±0.94b	18.93±1.48a	21.20±1.40a
			CK	13.54±1.34a	16.73±1.73a	20.65±1.34a
		伟科 702 KW702	KH	11.06±1.41b	24.80±2.04a	26.40±2.01a
			CK	14.10±1.32a	22.67±2.41a	26.05±1.34a
	9	农华 101 HN101	KH	9.61±0.97b	16.67±1.64a	19.90±2.07a

			CK	13.14±1.74a	15.53±1.54a	18.10±1.62a
		伟科 702 KW702	KH	10.41±0.86b	24.20±2.04a	25.10±2.17a
			CK	13.92±1.51a	21.33±1.39a	23.42±1.54a
2016	6	农华 101 HN101	KH	12.37±1.17a	20.00±1.87a	21.72±1.04a
			CK	14.40±1.24a	16.89±2.01a	18.67±1.67a
		伟科 702 KW702	KH	13.02±1.32a	22.78±2.14a	27.00±2.31a
			CK	15.13±1.52a	20.89±2.06a	26.00±2.04a
	7.5	农华 101 HN101	KH	10.13±0.98b	16.22±1.05a	18.33±1.08a
			CK	13.47±1.49a	15.56±0.54a	17.89±1.38a
		伟科 702 KW702	KH	10.98±1.04b	21.89±1.07a	25.78±1.49a
			CK	15.07±1.43a	21.78±1.48a	22.78±1.37a
	9	农华 101 HN101	KH	9.15±1.12b	15.52±0.99a	17.33±1.92a
			CK	12.67±1.20a	14.33±1.17a	17.22±1.09a
		伟科 702 KW702	KH	10.03±1.41b	20.78±1.65a	24.22±2.16a
			CK	13.99±1.07a	19.22±1.08a	23.67±1.07a

KH: 扩行缩株种植模式; CK: 当地农民常规种植模式。KH: Planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage; CK: Planting pattern of convention in local farmers.

2.4 扩行缩株种植模式下春玉米叶向值

由表 6 可知，各处理不同层位叶向值均表现为上部叶片＞中部叶片＞下部叶片，且随种植密度增大而增大。叶向值各处理间上部叶片均表现为 KH＞CK，且均达显著水平，尤以 D2 密度为甚，KH‘农华 101’较 CK 高 12.7%(2015 年)和 13.3%(2016 年), KH‘伟科 702’较 CK 高 12.5%(2015 年)和 12.8%(2016 年)。中部叶片和下部叶片均表现为 KH 小于 CK。‘农华 101’各层位叶向值均大于‘伟科 702’，说明‘农华 101’株型更为紧凑，更加适应 KH 种植。

表 6　扩行缩株(KH)常规(CK)种植模式下春玉米叶向值

Table6　Leaf orientation value of spring corn under the pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage(KH) and conventional pattenr (CK)

年份 Year	种植密度 Plant density (×10^4 plants hm^{-2})	品种 Variety	种植模式 Planting pattern	叶向值 Leaf orientation value		
				上部叶片 Top leaves	中部叶片 Middle leaves	下部叶片 Lower leaves
2015	6	农华 101 HN101	KH	56.51±2.11a	48.06±1.47a	44.06±2.14a
			CK	53.24±2.24a	49.60±1.82a	46.73±2.03a
		伟科 702 KW702	KH	55.95±1.94a	46.45±2.06a	43.09±1.94a
			CK	52.09±3.71a	47.97±2.14a	46.27±2.34a
	7.5	农华 101 HN101	KH	62.35±2.50a	52.86±2.78a	46.88±2.76a
			CK	55.35±2.64b	53.57±2.31a	51.96±2.03a
		伟科 702 KW702	KH	61.74±3.01a	51.93±1.54a	46.35±1.64a
			CK	54.88±2.41b	54.63±2.94a	50.52±3.04a
	9	农华 101 HN101	KH	67.87±2.37a	53.95±1.74a	50.31±2.16a
			CK	62.58±2.10b	56.08±3.20a	52.86±2.08a
		伟科 702 KW702	KH	66.42±2.91a	53.75±2.74a	50.44±3.08a
			CK	60.73±2.74b	56.08±2.91a	53.87±2.94a
2016	6	农华 101 HN101	KH	53.98±1.67a	45.45±2.41a	43.24±1.75a
			CK	49.93±2.43a	46.73±2.04a	44.69±2.46a
		伟科 702 KW702	KH	53.43±2.86a	45.29±2.06a	43.18±2.04a
			CK	49.44±2.12a	46.38±2.91a	44.62±2.61a
	7.5	农华 101 HN101	KH	60.75±2.41a	49.40±1.49a	47.61±2.75a
			CK	53.64±2.14b	52.74±1.35a	51.51±2.14a
		伟科 702 KW702	KH	59.26±2.14a	48.86±2.05a	46.85±2.04a
			CK	52.56±2.03b	51.14±2.40a	49.86±2.91a
	9	农华 101 HN101	KH	66.37±2.70a	55.83±2.94a	53.47±2.63a
			CK	58.72±2.94b	57.72±2.60a	55.23±2.19a
		伟科 702 KW702	KH	65.61±3.09a	55.35±2.01a	50.48±1.87a
			CK	58.58±2.10b	56.90±2.84a	52.67±1.95a

KH: 扩行缩株种植模式; CK: 当地农民常规种植模式。KH: Planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage; CK: Planting pattern of convention in local farmers.

春玉米茎叶夹角和叶向值的方差分析结果见表 7。由表 7 可知, KH 和 CK 种植模式下品种和种植密度间各层位茎叶夹角和叶向值均达显著或极显著水平，说明品种和种植密度能够显著影响春玉米茎叶夹角和叶向值，因为‘农华 101’各层位茎叶夹角均<‘伟科 702’，叶向值均>‘伟科 702’，其株型更加紧凑、挺拔，KH 种植模式下更有利于其生长发育。年份间 KH 和 CK 种植模式下各层位茎叶夹角均不显著，叶向值下部叶片不显著，中上部叶片显著。说明茎叶夹角不受年份间的影响，而叶向值中上部叶片受年份影响较大。从各因素交互作用的方差结果来看，品种、种植密度和年份间任意 2 个因素及 3 个因素之间 KH 和 CK 种植模式下茎叶夹角交互作用均不显著，叶向值除种植密度和年份间交互作用显著外，其他均不显著。

表 7　扩行缩株(KH)常规(CK)种植模式下春玉米茎叶夹角、叶向值方差分析

Table 7　Variance analysis results of stem-leaf angle and leaf orientation value of spring corn under planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage (KH) and conventional pattenr (CK)

分析指标 Analysis index	源 source	KH						CK					
		上部叶片 Top leaves		中部叶片 Middle leaves		下部叶片 Lower leaves		上部叶片 Top leaves		中部叶片 Middle leaves		下部叶片 Lower leaves	
		F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
茎叶夹角 Stem-leaf angle	品种 Variety (A)	14.752	0.018	60.516	0.002	193.222	0.005	7.595	0.041	451.854	0.006	76.109	0.001
	种植密度 Plant density (B)	152.510	0.026	11.885	0.001	19.433	0.001	4.134	0.036	4.377	0.001	7.317	0.006
	年份 Year (C)	6.840	0.120	15.639	0.058	6.035	0.133	0.261	0.660	35.686	0.067	18.711	0.080
	A ×B	0.649	0.536	3.161	0.070	0.515	0.607	0.746	0.490	0.369	0.697	1.534	0.246
	A ×C	1.497	0.288	0.814	0.418	0.004	0.952	8.993	0.070	1.089	0.356	0.047	0.839
	B ×C	0.002	0.998	0.088	0.916	0.374	0.694	0.900	0.426	0.557	0.584	1.684	0.217
	A ×B ×C	0.378	0.691	0.267	0.769	3.452	0.057	1.350	0.287	0.068	0.935	0.297	0.747
叶向值 Leaf orientation value	品种 Variety (A)	49.645	0.002	13.232	0.022	15.346	0.017	16.296	0.016	10.066	0.034	12.820	0.023
	种植密度 Plant density (B)	1 263.662	0.008	1185.486	0.004	245.184	0.006	1 368.195	0.005	635.809	0.026	545.186	0.009
	年份 Year (C)	128.986	0.008	146.758	0.007	6.767	0.121	40.033	0.024	44.597	0.022	1.857	0.306
	A ×B	0.861	0.441	1.328	0.293	0.989	0.394	0.221	0.805	0.183	0.834	3.344	0.061
	A ×C	0.055	0.827	2.096	0.221	3.405	0.139	1.881	0.242	0.703	0.449	5.512	0.079
	B ×C	4.529	0.028	111.945	0.031	3.897	0.042	5.201	0.018	4.916	0.022	11.903	0.001
	A ×B ×C	1.454	0.263	3.187	0.068	4.355	0.071	2.040	0.163	1.221	0.321	9.171	0.082

KH: 扩行缩株种植模式; CK: 当地农民常规种植模式; A: 品种; B: 种植密度; C: 年份。KH: Planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage; CK: Planting pattern of convention in local farmers; A:Variety; B:Plant density; C: Year.

2.5　扩行缩株种植模式下春玉米冠层透光率

由表 8 可知，各处理各层位两时期透光率均表现为乳熟期>吐丝期，且均随种植密度增加而降低。各处理不同层位透光率均表现为顶层>穗位层>底层。两时期各层位不同处理透光率均表现为 KH>CK，顶层和穗位层两时期均达显著水平，尤以 D2 密度下吐丝期穗位层为甚, KH‘农华 101’较 CK 高 5.1%(2015 年)和 5.0%(2016 年), KH‘伟科 702’较 CK 高 5.0%(2015 年)和 4.9%(2016 年)。两时期不同种植密度各层位透光率 KH‘农华 101’均大于 KH‘伟科 702’，这有利于冠层下部叶片充分吸收光能。

表 8　扩行缩株(KH)常规(CK)种植模式下春玉米冠层透光率

Table 8　Canopy transmittance rate of spring corn under the pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage (KH) and conventional pattern (CK)

年份 Year	种植密度 Plant density (×10^4plants hm^{-2})	品种 Variety	种植模式 Planting pattern	吐丝期透光率 Transmittance rate of silking (%)			乳熟期透光率 Transmittance rate of milking (%)		
				顶层 Top floor	穗位层 Ear layer	底层 Ground floor	顶层 Top floor	穗位层 Ear layer	底层 Ground floor
2015	6	农华 101 HN101	KH	49.64±2.10a	29.92±1.02a	12.39±1.02a	54.62±1.23a	34.11±1.21a	15.04±1.02a
			CK	45.34±1.84b	26.52±1.24b	10.05±1.03a	51.22±1.20b	31.44±1.34b	12.49±0.95b
		伟科 702 KW702	KH	48.25±1.94a	28.49±1.36a	11.77±0.94a	54.37±1.94a	33.20±1.21a	14.11±1.20a
			CK	45.04±1.86b	25.23±1.04b	9.31±0.91a	51.18±1.70b	30.84±1.61b	11.89±1.03b
	7.5	农华 101 HN101	KH	46.68±1.93a	24.25±1.47a	8.74±1.01a	50.12±1.74a	29.75±1.51a	12.75±1.24a
			CK	41.83±1.70b	19.20±1.94b	7.27±0.84a	45.92±1.62b	24.93±1.37b	10.69±1.19a
		伟科 702 KW702	KH	45.58±1.83a	23.59±1.80a	8.23±0.86a	49.92±1.54a	28.56±1.39a	11.89±1.51a
			CK	40.9±1.79b	18.59±1.76b	7.02±0.92a	45.73±1.21b	23.85±1.84b	9.84±1.32a

	9	农华 101 HN101	KH	37.99±2.04a	17.82±1.06a	6.85±0.88a	41.41±1.32a	23.36±1.04a	10.16±1.04a
			CK	33.62±1.34b	13.09±1.11b	5.74±0.90a	37.49±1.27b	18.76±1.35b	8.2±1.07a
		伟科 702 KW702	KH	36.51±1.94a	17.03±1.60a	6.19±0.84a	40.39±1.32a	22.56±1.47a	10.1±1.09a
			CK	32.09±1.35b	12.48±1.31b	5.09±0.45a	37.05±1.75b	18.34±1.62b	8.11±0.98a
2016	6	农华 101 HN101	KH	49.84±2.01a	29.75±1.11a	12.38±0.98a	53.95±1.25a	34.25±1.51a	15.41±1.20a
			CK	45.37±1.47b	26.27±1.24b	10.41±1.21a	50.54±1.34b	31.53±1.01b	12.91±1.10b
		伟科 702 KW702	KH	48.48±2.03a	28.10±1.50a	12.08±1.42a	53.04±1.76a	33.30±1.23a	14.05±1.04a
			CK	45.19±1.04b	24.87±1.23b	10.02±1.18a	50.11±1.09b	30.75±1.54b	11.77±1.11b
	7.5	农华 101 HN101	KH	46.82±2.04a	24.28±1.23a	9.47±0.84a	50.05±2.10a	29.81±1.86a	12.79±0.79a
			CK	41.94±1.54b	19.30±1.08b	7.84±0.74a	46.14±1.52b	24.84±1.45b	11.03±1.27a
		伟科 702 KW702	KH	45.46±1.92a	23.77±1.68a	8.76±0.94a	49.72±1.86a	28.54±1.91a	12.16±1.24a
			CK	41.41±1.34b	18.84±1.06b	7.23±0.86a	45.94±1.79b	23.74±1.42b	10.75±1.08a
	9	农华 101 HN101	KH	38.04±1.66a	18.91±1.12a	6.95±0.67a	42.21±2.03a	23.43±1.51a	10.05±1.24a
			CK	33.81±1.50b	14.20±1.21b	5.76±0.75a	38.50±1.01b	18.82±1.34b	8.73±0.76a
		伟科 702 KW702	KH	36.76±1.09a	17.01±1.35a	6.30±0.81a	40.51±1.24a	22.74±1.05a	9.88±0.88a
			CK	32.63±1.42b	12.65±1.26b	5.12±0.93a	37.11±1.36b	18.42±1.04b	8.20±0.96a

KH: 扩行缩株种植模式; CK: 当地农民常规种植模式。KH: Planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage; CK: Planting pattern of convention in local farmers.

春玉米冠层透光率的方差分析见表 9。由表 9 可知, KH 和 CK 种植模式下品种和种植密度间各层位冠层透光率均达显或极显著水平, 说明品种和种植密度能够显著影响春玉米冠层透光率。年份间 KH 和 CK 种植模式下各层位冠层透光率均不显著, 说明冠层透光率不受年份间影响。从各因素交互作用的方差结果来看, 品种、种植密度和年份间任意 2 个因素及 3 个因素之间 KH 和 CK 种植模式下冠层透光率交互作用均不显著。

表 9　扩行缩株(KH)常规(CK)种植模式下春玉米冠层透光率方差分析

Table 9　Variance analysis results of canopy transmittance rate of spring corn under planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage (KH) and conventional pattern (CK)

源 source	KH						CK					
	顶层 Top floor		穗位层 Ear layer		底层 Ground floor		顶层 Top floor		穗位层 Ear layer		底层 Ground floor	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
品种 Variety (A)	19.898	0.011	7.838	0.049	12.357	0.025	9.154	0.039	33.285	0.005	8.129	0.046
种植密度 Plant density (B)	1480.961	0.005	584.644	0.008	451.652	0.007	1768.476	0.008	1609.628	0.004	261.718	0.006
年份 Year （C）	0.532	0.542	1.278	0.376	5.797	0.138	4.613	0.165	0.372	0.604	2.580	0.249
A×B	0.072	0.931	2.386	0.124	0.149	0.863	3.533	0.054	1.722	0.210	0.150	0.862
B×C	0.003	0.987	0.949	0.385	0.018	0.901	0.320	0.602	0.769	0.430	3.838	0.297
A×C	0.109	0.897	0.822	0.457	1.211	0.324	0.240	0.790	2.254	0.137	0.878	0.435
A×B×C	0.134	0.875	0.879	0.434	0.245	0.786	0.063	0.939	0.818	0.459	0.401	0.676

KH: 扩行缩株种植模式; CK: 当地农民常规种植模式; A: 品种; B: 种植密度; C: 年份。KH: Planting pattern of line spacing expansion and row spacing shrinkage; CK: Planting pattern of convention in local farmers; A:Variety; B:Plant density; C: Year.

3　讨论

合理的株行距配置可以较好地协调高密度条件下个体通风受光条件[18], 能够改善玉米对微气象因子特别是光的利用, 进而增加产量[20]。受地域及环境因素的影响, 关于株行距配置对玉米冠层结构及产量影响的研究结果并不一致, 杨克军[16]、杨吉顺等[9]认为, 适宜密度下采用宽窄行种植方式能够改善群体冠层结构, 减少株间竞争、促进个体生长发育、提高群体光合特性; 而苌建峰等[17]、杨利华等[18]认为, 等行距处理提高了群体的整齐度, 冠层分布合理, 有利于产量的提高。叶面积指数是表征玉米光合生产能力的重要指标[21], 也是植物截获光能的物质载体[15], 其在冠层中的分布是反映作物冠层结构性能的重要指标。吕丽华等[22]认为, 延长玉米叶片功能期, 使生育后期叶面积下降较缓慢, 在高密度下有利于提高玉米光能利用效率和籽粒产量。本研究中, 不同密度下 KH 种植模式生育后期叶面积指数均高于 CK, 且乳熟期均达显著水平, 以 2016 年 D2 密度下'伟科 702'差异最大, 达 15.8%; 完熟期 2015 年达显著水平, 以 D2 密度下'伟科 702'差异最大, 达 29.8%, 2016 年无差异。KH 种植模式不但生育后期叶面积指数较高, 其下降速度缓慢, 延长了叶面积指数的高值持续期, 增加了叶片光合有效时间, 不同种植密度下 KH 和 CK 乳熟期叶面积指数均较

吐丝期下降，但 KH 种植模式叶面积下降缓慢，生育后期维持较高的叶面积是其增产的原因之一。

高产玉米应具有高光效的冠层结构。薛吉全等[23]研究发现，在较高密植条件下良好的冠层结构接受的光能合理地分配到群体各叶层，使中下部叶片处于较好的照光状态，以维持较高水平群体内透光率。而茎叶夹角和叶向值是玉米冠层结构的主要参数，也是决定群体透光率和受光姿态的重要指标[24]。本研究中，KH 种植模式下上部叶片茎叶夹角较小，叶向值较大，而中部叶片和下部叶片茎叶夹角较大，叶向值较小。KH 种植模式改变了冠层结构，使其上部叶片更加挺直，有利于光线入射，提高了群体冠层透光率，使其各层位透光率均大于 CK，且顶层和穗位层均达显著水平，尤以 D2 密度下穗位层透光率差异最为明显；下部叶片更加平展，能够充分吸收入射的光能，提升了叶片的光能利用效率，减少漏光损失。这与王元东[25]等研究结论一致，是 KH 种植模式增产的原因之一。

Eastin[26]提出每一玉米品种都应该有不同的种植行距，以期达到适宜的冠层结构。本研究表明，KH 种植模式下'农华 101'整体表现优于'伟科 702'，其各层位叶面积分布较为均匀，且叶面积和茎叶夹角均小于'伟科 702'，株型更为紧凑，其中 7.5×10^4 株 hm^{-2} 密度下冠层结构更为合理，产量最高。凌启鸿[27]等认为，玉米不同品种根系存在较大差异，且对地上部有直接调控作用，根系分布较深且多纵向时，叶角较小，叶片趋于直立，根系分布较浅且多横向时，叶角较大，叶片趋于披垂。KH'农华 101'根系可能表现为横向紧缩，纵向延伸类型，有利于吸收下层土壤肥水，是致使产量增加的另一原因。综上所述，西辽河平原及其同类地区，要想实现高产密植栽培生产，可选用'农华 101'类型品种在 7.5×10^4 株 hm^{-2} 密度下进行 KH 种植，其合理的株行距配置及高效的冠层结构有利于春玉米产量潜力的发挥。

4 结论

KH 种植模式对春玉米冠层结构影响显著，且不同品种对冠层结构响应不同。KH 种植模式下各时期叶面积指数均＞CK；不同层位叶面积指数中上部叶片各时期也均＞CK，下部叶片吐丝期＜CK，乳熟期＜CK；各阶段叶面积衰减率均＜CK，说明吐丝后叶面积指数下降缓慢，利于生育后期叶片进行较好的光合作用；不同品种叶面积指数表现为'伟科 702'大于'农华 101'，但'农华 101'各层位叶面积指数分布较为均匀，冠层光能利用较为合理，'伟科 702'下部叶片叶面积指数较大，上部叶片叶面积指数较小，影响了上部叶片的光合作用。KH 种植模式下春玉米茎叶夹角表现为下部叶片＞中部叶片＞上部叶片，其中上部叶片茎叶夹角＞CK，中下部叶片茎叶夹角小于 CK；叶向值表现为上部叶片＞中部叶片＞下部叶片，其中上部叶片叶向值＞CK，中下部叶片叶向值＜CK；这种冠层分布不但上部叶片充分吸收光能，也有利于光线入射到冠层底部，使下部叶片接收较多光能，利于产量增加，且'农华 101'各层位茎叶夹角均＜CK，叶向值均＞CK，表明'农华 101'品种株型更为紧凑，密植条件下，产量优势较为明显。本试验结果也表明，KH 种植模式下春玉米冠层透光率各层位均＞CK，且穗位层差异最为明显，这也保证了下部叶片尽可能多的物质生产。测产数据表明，不同种植密度下 KH 种植模式实测产量均＞CK，在 7.5×10^4 株 hm^{-2} 密度下产量最高，KH'农华 101'实测产量均＞KH'伟科 702'，且增产更为明显。

参考文献　References

[1] 李少昆，赵久然，董树亭，等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959.
Li S K, Zhao J R, Dong S T, et al. Advances and Prospects of Maize Cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1941-1959.

[2] 李少昆，王崇桃. 玉米生产技术创新扩散[M]. 北京：科学出版社, 2010.
Li S K, Wang C T. Innovation and Diffusion of Corn Production Technology[M]. Beijing: Science Press, 2010.

[3] 宋慧欣，付铁梅，杨殿伶,等. 以增加密度为核心，集成推广玉米高产创建技术体系[J]. 作物杂志, 2010, (05): 114-117.
Song H X, Fu T M, Yang D L, et al. To increase the density as the core, to promote the promotion of high yielding to create a technical system[J]. Crops, 2010, (05): 114-117.

[4] 张玉芹，杨恒山，高聚林，等. 超高产春玉米冠层结构及其生理特性[J]. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4367-4376.
Zhang Y Q, Yang H S, Gao J L, et al. Study on Canopy Structure and PhysiologicalCharacteristics of Super-High Yield Spring Maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(21): 4367-4376.

[5] 靳立斌，张吉旺，李波，等. 高产高效夏玉米的冠层结构及其光合特性[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2430-2439.
Jin L B, Zhang J W, Li B, et al. Canopy Structure and Photosynthetic Characteristics of High Yield and High Nitrogen Efficiency

Summer Maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(12): 2430-2439.
[6] 杨国虎，李新，王成莲，等. 种植密度影响玉米产量及部分产量相关性状的研究[J]. 西北农业学报, 2006, 15(5): 57-60.
Yang G H, Li X, Wang C L, et al. Study on Effects of Plant Densities on the Yield and the Related Characters of Maize Hybrids[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2006, 15(5): 57-60.
[7] 沈秀瑛，戴俊英，胡安畅，等. 玉米群体冠层特征与光截获及产量关系的研究[J]. 作物学报, 1993, 19(3): 246-252.
Shen X Y, Dai J Y, Hu A C, et al. Study on the Relationship between Canopy Characteristics and Light Interception and Yield of Maize Population[J]. Acta Agronomica Sinica, 1993, 19(3): 246-252.
[8] 王庆祥，顾慰连，戴俊英，等. 玉米群体的自动调节与产量[J]. 作物学报, 1987, 13(4): 281-287.
Wang Q X, Gu W L, Dai J Y, et al. Automatic Regulation and Yield of Maize Population[J]. Acta Agronomica Sinica, 1987, 13(4): 281-287.
[9] 杨吉顺，高辉远，刘鹏，等. 种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响[J]. 作物学报，2010，36(7): 1226-1233.
Yang J S, Gao H Y, Liu P, et al. Effects of Planting Density and Row Spacing on Canopy Apparent Photosynthesis of High-Yield Summer Corn[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(7): 1226-1233.
[10] 杨恒山，张瑞富，张玉芹，等. 西辽河平原灌区玉米宽行少耕高产高效种植模式的研究[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2014, 29(5): 559-561.
Yang H S, Zhang R F, Zhang Y Q, et al. Study on High Yield and High Efficiency Cropping Modes of Wide Row and Reduced Tillage for Maize in West Liaohe River Plain Irrigated Regions[J]. Journal of Inner Mongolia University For Nationalities, 2014, 29(5): 559-561.
[11] Andrade F H, Calvino P, Cirilo A, Barbieri P. Yield responses to narrow rows depend on increased radiation interception[J]. Agronomy journal, 2002, 94: 975-980.
[12] Reta-Sanchez D G, Fowler J L. Canopy light environment and yield of narrow-row cotton as affected by canopy architecture[J]. Agronomy journal, 2002, 94: 1317-1323.
[13] Sharratt B S, Mcwilliams D A. Microclimatic and rooting characteristics of narrow-row versus conventional-row corn[J]. Agronomy journal, 2005, 97: 1129-1135.
[14] 吕丽华，赵明，赵久然，等. 不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9): 2624-2632.
Lv, L H, Zhao M, Zhao J R, et al. Canopy Structure and Photosynthesis of Summer Maize Under Different Nitrogen Fertilizer Application Rates[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(9): 2624-2632.
[15] 徐丽娜，黄收兵，陶洪斌，等. 不同氮肥模式对夏玉米冠层结构及部分生理和农艺性状的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(2): 301-306.
Xu L N, Huang S B, Tao H B, et al. Effects of Different Nitrogen Regimes on Canopy Structure and Partial Physiological and Agronomic Traits in Summer Maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(2): 301-306.
[16] 杨克军，李明，李振华. 栽培方式与群体结构对寒地玉米物质积累及产量形成的影响[J]. 中国农学通报，2005，11(21): 157-160.
Yang K J, Li M, Li Z H. Effect of Cultivation Way and Communiy Construotion on Material Accumulation and Yield Formation of Frigid Corn[J]. Chinese Agricultural Seience Bulletin, 2005, 11(21): 157-160.
[17] 苌建峰，张海红，董朋飞，等. 种植模式对不同株型夏玉米品种生理生态效应比较[J]. 玉米科学, 2014, 22(3):115-120.
Chang J F, Zhang H H, Dong P F, et al. Comparison on Physiological and Ecological Effects of Planting Patterns in Summer Maize with Different Morphological Types[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(3):115-120.
[18] 杨利华，张丽华，张全国，等. 种植样式对高密度夏玉米产量和株高整齐度的影响[J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 122-124.
Yang L H, Zhang L H, Zhang Q G, et al. Effect of Row Spacing Pattern on Yield and Plant Height Uniformity in Highly-densed Summer Maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(6): 122-124.
[19] 何冬冬，杨恒山，张玉芹，等. 扩行缩株对春玉米干物质积累与转运的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(3): 73-79.
He D D, Yang H S, Zhang Y Q, et al. Effects of Widening row spacing and Shortening plant spacing on Try matter Accumulation and Transportation in Spring Maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(3): 73-79.
[20] 苌建峰，张海红，李鸿萍，等. 不同行距配置方式对夏玉米冠层结构和群体抗性的影响[J]. 作物学报，2016，42(1): 104-112.
Chang J F, Zhang H H, Li H P, et al. Effects of Different Row Spaces on Canopy Structure and Resistance of Summer Maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(1): 104-112.
[21] 朱从桦，张嘉莉，王兴龙，等. 硅磷配施对低磷土壤春玉米干物质积累、分配及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 725-735.
Zhu C H, Zhang J L, Wang X L, et al. Effects of combined application of silicon and phosphorus fertilizers on dry matter

accumulation and distribution and grain yield of spring maize in low phosphorus soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 725-735.

[22] 吕丽华，王璞，鲁来清. 不同冠层结构下夏玉米产量形成的源库关系[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 66-71.Lv L H, Wang P, Lu L Q. The Relationship of Source-sink for Yield Form in Summer Maize Under Different Canopy Structure[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 66-71.

[23] 薛吉全，梁宗锁，马国胜，等. 玉米不同株型耐密性的群体生理指标研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(1): 55-59.
Xue J Q, Liang Z S, Ma G S, et al. Population physiological indices on density-tolerance of maize in different plant type [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(1): 55-59.

[24] 马国胜，薛吉全，路海东，等. 播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响[J]. 应用生态学报，2007，18(6): 1247-1253.
Ma G S, Xue J Q, Lu H D, et al. Effects of planting date and density on population physiological indices of summer corn (*Zea mays L.*)incentral Shaanxi irrigation area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1247-1253.

[25] 王元东，民孝，邢锦丰，等. 玉米理想株型育种的研究进展与展望[J]. 玉米科学, 2008, 16(3): 47-50.
Wang Y D, Min X, Xing J F, et al. Progress and Prospect in Ideal Plant Type Breeding in Maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(3): 47-50.

[26] Eastin J D. Leaf position and leaf function in corn Carbon-14 labeled photosynthetic distribution in corn in relation to leaf position and leaf function[J]. Proc 24th A Corn and Sorghum Res Conf, 1969, 24: 81-89.

[27] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海：上海科学技术出版社, 2000.
Ling Q H. Crop Population Quality[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000.